

М. О. Кувишинов^{*}, А. А. Хлыбов^{}, Д. Ю. Магин**

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева,
г. Нижний Новгород

^{*}*maksuvshinov2007@yandex.ru*; ^{**}*hlybov_52@mail.ru*

Научный руководитель – проф., д-р техн. наук А. А. Хлыбов

УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ПОВЕРХНОСТНОЕ ПЛАСТИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ – ЭФФЕКТИВНЫЙ МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТАЛЕЙ МАШИН

В статье рассмотрен один из методов динамического деформационного упрочнения – ультразвуковое поверхностное пластическое деформирование. Показано влияние знакопеременных ультразвуковых колебаний на структуру материала и поведение дислокаций.

Ключевые слова: поверхностное пластическое деформирование, ультразвуковое упрочнение, структура, фазовый состав, микротвердость, шероховатость.

М. О. Kuvshinov, A. A. Khlybov, D. Yu. Magin

ULTRASONIC SURFACE PLASTIC DEFORMATION – EFFICIENT METHOD FOR IMPROVEMENT OF PERFORMANCE OF MACHINE PARTS

The article describes a method of dynamic strain hardening - ultrasonic surface plastic deformation. The effect of alternating ultrasonic vibrations to the material structure and the behavior of dislocations.

Keywords: surface plastic deformation, ultrasonic strengthening, structure, phase composition, microhardness, roughness.

В число важнейших задач современного машиностроения и других отраслей металлообрабатывающей промышленности входит повышение эксплуатационной надежности и долговечности промышленных изделий, повышение эффективности машин и оборудования.

Эксплуатационная надежность и качество промышленных изделий в свою очередь зависят от свойств конструкционных материалов, из которых они изготовлены. Износостойкость, прочность (статическая и динамическая), сопротивление усталостному разрушению, коррозионные и прочие свойства металлов относятся к числу основных факторов, которые определяют эксплуатационные свойства и качество изделий.

Наиболее простыми методами улучшения эксплуатационных свойств машин, получившими в последнее время широкое распространение,

являются отделочно-упрочняющие методы поверхностного пластического деформирования (ППД).

ППД – это обработка деталей давлением, при которой пластически деформируется только их поверхностный слой. ППД осуществляется инструментом, деформирующие элементы которого взаимодействуют с обрабатываемой поверхностью по схемам качения, скольжения или внедрения. Основное назначение ППД – уменьшение шероховатости поверхности, деформационное упрочнение поверхностного слоя, создание сжимающих остаточных напряжений, изменение размеров заготовки до допустимых, образование определенной макро- или микрогеометрической формы [2].

Изучению технологии ППД в отечественной науке в период 60–80-х гг. XX века было посвящено большое количество работ. Весомых результатов в данной области достигли В. М. Браславский, А. И. Марков, И. И. Муханов, Д. Д. Папшев, Л. Г. Одинцов, В. М. Смелянский и другие. Впервые метод ППД с использованием ультразвука был предложен И. И. Мухановым в 1964 г.

Ультразвуковая обработка (УЗО) представляет собой прогрессивную технологию отделочно-упрочняющей обработки металлов давлением, которая позволяет заменить классические статические методы ППД (выглаживание, накатывание). От обычного выглаживания метод ППД ультразвуковым инструментом отличается тем, что инструмент совершает колебания с ультразвуковой частотой. Амплитуда колебаний поляризована в плоскости, перпендикулярной обрабатываемой поверхности детали. В процессе обработки инструмент прижимается к обрабатываемой поверхности с постоянной силой. Перемещение инструмента по поверхности осуществляется путем вращения детали с определенной скоростью и перемещения инструмента вдоль образующей с определенной скоростью (см. рис.). Метод ультразвукового ППД имеет ряд преимуществ по сравнению со статическими методами ППД, таких как: высокая скорость деформирования, малое статическое усилие, низкая температура нагрева обрабатываемого изделия.

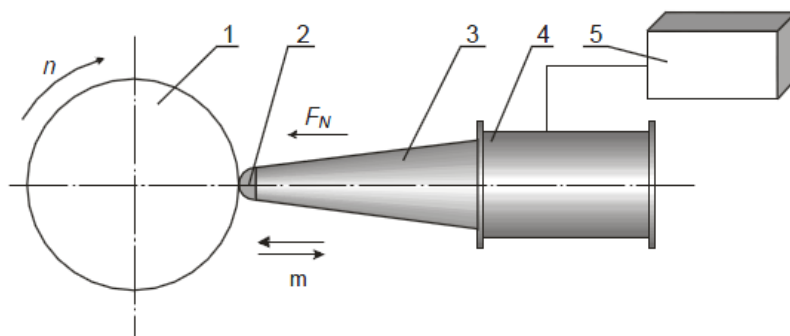


Схема поверхностного пластического деформирования ультразвуковым инструментом:

- 1 – обрабатываемое изделие; 2 – индентор; 3 – волновод-концентратор;
4 – ультразвуковой преобразователь; 5 – генератор

При наложении ультразвуковых колебаний возникают сложные процессы: наложение знакопеременных нагрузок на статические нагрузки, локальное поглощение ультразвуковой энергии и, как результат этого, изменение условий течения металла и облегчение пластического деформирования. Сложение статического напряжения с амплитудным значением знакопеременного напряжения делает суммарное напряжение достаточным для преодоления дислокациями потенциальных барьеров, т. е. для более раннего появления пластических деформаций. Активация дислокаций происходит в основном за счет поглощения акустической энергии в местах дефектов кристаллической решетки и других структурных несовершенств. За время, исчисляемое миллисекундами, происходит локальный нагрев вокруг источников поглощения, снятие напряжений, разблокировка дислокации, увеличение их подвижности. Все это обеспечивает более интенсивный ход пластической деформации [1].

С точки зрения структурно-фазовых изменений, происходящих при деформировании поверхностного слоя металла, пластическая деформация распространяется по определенным кристаллографическим плоскостям и направлениям. Внутри зерен, представляющих собой совокупность блоков однородно ориентированных кристаллических решеток и первоначально имеющих различную ориентировку и межзеренные границы, за счет петель Франка – Рида происходит интенсивное образование и движение дислокаций, в результате чего их число увеличивается на несколько порядков. Дислокации перемещаются внутри зерен по плоскостям скольжения, т. е. «эстафетным путем». Внутри одного зерна дислокации взаимодействуют как между собой, так и с вакансиями, межузельными и примесными атомами. При пластической деформации наблюдается раздробление кристаллов на фрагменты и новые блоки с большими искажениями решетки на границах, а также увеличение степени разориентированности фрагментов и блоков, что служит препятствием для сдвиговой деформации, которая происходит главным образом по внутрикристаллическим плоскостям скольжения. Зерна приобретают определенную форму и ориентацию, вытягиваясь в направлении главной деформации и создавая «текстуру деформации», что приводит к анизотропии механических свойств. Вокруг дефектов кристаллическая решетка становится сильно деформирована, и в зернах возникает поле напряжений второго рода – остаточные микронапряжения, уравнивающиеся в объемах, соизмеримых с размерами самих зерен. Таким образом, пластическое деформирование, сопровождающееся дроблением блоков и увеличением плотности дислокаций внутри зерен, приводит к повышению числа границ, затрудняющих сдвиговые процессы и блокирующих последующее перемещение (торможение) дислокаций. В результате этого способность искаженной решетки к дальнейшей деформации оказывается исчерпанной [3].

В наклепанном металле плотность дислокаций достигает величины 10^{11} – 10^{12} см⁻². При этом некоторое значение плотности в интервале 10^5 – 10^8 см⁻² характеризуется минимальным сопротивлением разрыву, что соответствует структуре металла после отжига. При уменьшении количества дислокаций число дефектов кристаллической решетки снижается, и ее прочность приближается к теоретической, а при увеличении их числа прочность возрастает в связи с сопротивлением дальнейшему перемещению. Таким образом, деформация кристаллической решетки, приводящая к образованию «леса дислокаций», является причиной упрочнения металла при ППД.

Характерными особенностями ультразвуковой обработки являются: высокая частота ультразвуковых колебаний ($f \approx 10^4$ Гц), незначительная амплитуда колебаний ($A = 10$ – 20 мкм), небольшая статическая сила прижима ($P_{ст} = 30$ – 300 Н), весьма малое время контакта деформирующего элемента с изделием $\tau \approx 3 \cdot 10^{-5}$ с, значительная колебательная скорость инструмента $V_i = 2 \pi \cdot f \cdot A \geq 2$ – 3 м/с, ускорение $j = (2\pi \cdot f)^2 A \geq 24 \cdot 10^4$ м/с² и многократность деформирования.

Малые величины амплитуды колебаний и статической силы не обеспечивают достаточной пластической деформации поверхностного слоя, и твердость обрабатываемой поверхности практически не меняется. При увеличении амплитуды колебаний и статической силы в поверхностном слое создается напряжение, при котором плотность дислокаций близка к критической, и твердость увеличивается. При чрезмерном увеличении амплитуды и статической силы поверхностный слой начинает разрушаться, и твердость уменьшается. Аналогичным образом с амплитудой и статической силой связан параметр шероховатости поверхности.

На микротвердость и шероховатость поверхности большое влияние оказывают продольная подача, скорость относительного перемещения обрабатываемой поверхности и радиус сферы рабочей части деформирующего элемента.

Процесс ультразвуковой обработки от статического способа упрочняющей обработки – например, обкатывания шариком – отличается следующим: ультразвуковой инструмент пластически деформирует поверхностный слой детали импульсно, с большой интенсивностью колебаний; контактирование инструмента с поверхностью обрабатываемого изделия и его деформирование сопровождаются прерывистым и интенсивным трением скольжения (трение качения отсутствует); статическая сила, действующая на изделие, незначительна; среднее давление, создаваемое в поверхностном слое изделия, под действием нормально направленной силы в 3–9 раз больше, чем при обкатывании; перемещение рабочей части деформирующего элемента

происходит одновременно в направлении относительной скорости перемещения обрабатываемой поверхности и перпендикулярно ей.

В процессе ультразвуковой обработки из-за многократности воздействия нагрузки, напряженно-деформированное состояние отличается от обычного статического воздействия. Вследствие этого образуются различные преимущественные ориентировки текстуры деформирования, а пластическое деформирование осуществляется множественным скольжением, оно происходит даже в тех плоскостях, которые энергетически для этого невыгодны. Множественное скольжение создает дополнительное торможение движению дислокаций [1].

В таблице представлены сравнительные данные о характеристиках поверхностного слоя, достигаемых применением статического обкатывания шариком и ультразвуковой обработки.

Характеристики поверхностного слоя, достигаемые применением различных способов обработки

Обрабатываемый материал	Микротвердость, ГПа			Шероховатость, мкм		
	Исходная	Обкатывание	УЗО	Исходная	Обкатывание	УЗО
Сталь 45	2180	3900	5000	2,60	0,25	0,20
Сталь 10А	8600	10100	11800	0,30	0,22	0,18
Сталь ШХ15	8400	9480	10300	0,35	0,23	0,14

Проблема создания эффективных методов упрочнения поверхностей деталей является одной из самых важных в машиностроении. Большинство деталей работает в условиях интенсивного износа, при высоких контактных нагрузках и неблагоприятных условиях воздействия окружающей среды. Одним из наиболее эффективных способов упрочнения является ультразвуковое поверхностное пластическое деформирование.

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьев С. Н., Табаков В. П., Волосова М. А. Технологические методы повышения износостойкости контактных площадок режущего инструмента. Старый Оскол: ТНТ, 2011. С. 378.
2. Смелянский В. М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. М. : Машиностроение, 2002. С. 300.
3. Панин В. Е. Сергеев В. П., Панин А. В. Наноструктурирование поверхностных слоев конструкционных материалов и нанесение наноструктурных покрытий: учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. С. 254.
4. Технологическое применение ультразвука в транспортном машиностроении / В. М. Приходько [и др.]. М. : Издательство «Техполиграфцентр», 2007. С. 112.